

Döntött impulzusfrontú gerjesztésen alapuló terahertzes impulzusforrások optimalizálása

Akadémiai doktori értekezés tézisei

Pálfalvi László

Pécsi Tudományegyetem

Fizikai Intézet, Kísérleti Fizika Tanszék

Pécs, 2017.

Tartalomjegyzék

1. A kutatások előzménye	2
2. Célkitűzések	3
3. Vizsgálati módszerek	4
4. Új tudományos eredmények	5
5. Az eredmények hasznosítása	9
6. Irodalmi hivatkozások listája (idegen szerzők)	10
7. Irodalmi hivatkozások listája (saját)	11
8. A tézispontok alapjául szolgáló saját tudományos közlemények	11

1. A kutatások előzménye

A távoli infravörös (terahertzes, THz-es) frekvenciatartományba eső sugárzás előállításával kapcsolatos kutatások néhány évtizedre nyúlnak vissza. A terahertzes fizika mint önállóvá vált tudományterület az utóbbi időben robbanásszerű fejlődést mutatott. Ez, a mindennapi életünkhöz is szorosan kapcsolódó, széles körű alkalmazások (pl. biztonságtechnika, analitika, orvostudomány, gyógyszer-, élelmiszer- és agráripár, ipari folyamatirányítás, kommunikáció), illetve a nagyenergiájú THz-es impulzusokra épülő új kutatási irányok (pl. elektromosan töltött részecskék gyorsítása és manipulálása, anyagi folyamatok kontrollja, THz-es impulzusok segítségével történő attoszekundumos impulzusgenerálás) megjelenésének volt köszönhető.

Kvázi-egyciklusú, nagyenergiájú THz-es impulzusok előállítására ígéretes módszer a közeli infravörös, ultrarövid pumpáló-impulzusok nemlineáris optikai közegben történő optikai egyenirányítása [Auston1984]. Néhány, kimagaslóan jó nemlineáris optikai tulajdonságokkal rendelkező anyag esetén azonban a hatékony THz-keltéshez nélkülözhetetlen sebességillesztés (azaz a pumpáló impulzus csoportsebességének, és a keltett THz-es sugárzás fázissebességének szinkronizálása) megoldhatatlannak tűnt, mivel a pumpálásra és a THz-es tartományra vonatkozó törésmutatók különbsége jelentős.

A terahertzes tudomány fejlődéstörténetében mérföldkőnek számít a Pécsi Tudományegyetem Fizikai Intézetében, a kétezres évek elején kidolgozott, ún. döntött impulzusfrontú gerjesztési módszer [Hebling2002], ami a pumpáló impulzusok intenzitásfrontjának (impulzusfrontjának) a fázisfronthoz képest történő megdöntésén alapul. Az impulzusfrontdöntés megvalósítása a pumpáló-nyaláb optikai rácson való diffrakciójával történik. E kreatív ötlet lehetővé teszi a sebességillesztett THz-keltést kiemelt fontosságú nemlineáris optikai anyagokban.

A nagyenergiájú THz-es impulzusok előállítása terén az utóbbi bő évtizedben forradalmi szerepet töltött be a lítium-niobát (LiNbO_3). A Pécsi Tudományegyetem kutatói a THz-es impulzusenergiának igen látványos, hét nagyságrenddel való megnövelését érték el LiNbO_3 -tal, döntött impulzusfrontú gerjesztést alkalmazva. Napjainkban közel fél mJ-os THz-es impulzusenergia érhető el [Fülöp2014]. A Pécsen született THz-es eredmények világviszonylatban az élvonalba tartoznak. Hosszú éveken át a pécsi kutatók állították elő a világon a legnagyobb energiájú THz-es impulzusokat.

2. Célkitűzések

Az értekezésben ismertetett kutatásaim fő célja az volt, hogy a kísérletekben használt döntött impulzusfrontú gerjesztésen alapuló hagyományos (azaz egy optikai rácsból, leképező optikából és nemlineáris közegből álló) THz-es impulzusforrásokat a THz-keltés hatásfokára, illetve a keltett THz-es impulzus energiájára nézve optimalizáljam. Célul tűztem ki továbbá, e hagyományos források korlátozó tényezőinek feltérképezését, illetve megoldások keresését bizonyos korlátok mérséklésére, megszüntetésére.

A döntött impulzusfrontú pumpálással való THz-keltés tervezéséhez mind az optikai, mind a THz-es tartománybeli dielektromos jellemzők ismerete fontos. A THz-keltés hatásfokát jelentősen befolyásolja a keltő közeg abszorpciója. A sebességillesztéshez szükséges impulzusfront-döntés mértékét a törésmutatók (optikai és THz-es egyaránt) határozzák meg. Mindebből kifolyólag fontosnak láttam az alkalmazásokhoz ígéretes LiNbO_3 és lítium-tantalát (LiTaO_3) oxidkristályok THz-es tartománybeli dielektromos tulajdonságainak tanulmányozását. Különösen fontosnak tartottam a Mg-adalékolás, és a kriogenikus hűtés abszorpcióra való hatásának vizsgálatát. E vizsgálatok eredményeitől vártam, hogy állásfoglalást tehessek az optimális összetételű (többek közt minimális abszorpciójú) THz-generátor kristály mellett. Érdekesnek és fontosnak találtam annak körbejárását, hogy a THz-keltésre tömbkristály helyett hullámvezető struktúrát használva, az abszorpció hatásának milyen mértékű további csökkenése érhető el.

A THz-keltés hatásfokát a pumpálás hatására bekövetkező nemlineáris (fotorefraktív, vagy termo-optikai eredetű) nyalábtorzulások is befolyásolják. A nemlineáris karakterizálásra olyan elméleti modell kidolgozását tűztem ki célul, melynek alkalmazhatósága nem korlátozott sem a mintavastagság, sem a nemlinearitás mértéke által (általános z -scan modell). Fontosnak tartottam azt is, hogy a kidolgozott modell segítségével a z -scan módszer szakirodalmában található ellentmondásokat tisztázzam.

A THz-es energia felskálázása érdekében célul tűztem ki a döntött impulzusfrontú gerjesztés leghatékonyabb megvalósításához teljesítendő feltételrendszer kidolgozását. Választ kerestem arra, hogy e feltételek teljesítéséhez az egy lencsét, illetve a teleszkópot tartalmazó hagyományos THz-es impulzusforrásokat milyen rendezési elv szerint kell összeállítani. A THz-es energia felskálázásának szempontjából különösen fontosnak tartottam a leképezési hibákból fakadó hatások részletes analízisét, azok redukálási lehetőségének vizsgálatát. Gyakorlati szempontokat is szem előtt tartva, kerestem a döntött impulzusfrontú THz-keltés leképező optika nélküli megvalósíthatóságának lehetőségét is. Az optimalizáci-

óhoz fontosnak láttam az optikai rácson történő diffrakció hatásfokának a maximalizálását is.

A hadronterápia mint a rákgyógyítás ismert módszere motivált abban, hogy elgondolkodjam azon, hogy milyen potenciál rejlik az extrém nagy elektromos térerősséggel rendelkező THz-es impulzusokkal történő részecskegyorsításban.

3. Vizsgálati módszerek

Az MTA Wigner Fizikai Kutatóközpontban (az intézmény jogelődje Kristálytechnológiai Osztályán) növesztett Zr- és Mg-adalékolású LiNbO_3 kristályok karakterizálásával kapcsolatos kísérleti munka túlnyomórészt a PTE Fizikai Intézetében az általam e célra installált laboratóriumokban történt. A Zr-adalékolású LiNbO_3 minták fotorefrakcióját és termo-optikai nemlinearitását folytonos üzemű Ar-ion lézert használva, z -scan módszerrel vizsgáltam. A Mg-adalékolású LiNbO_3 minták 0,2–2,0 THz-es tartománybeli törésmutató és abszorpciós együttható-spektrumainak felvétele a PTE Fizikai Intézete tulajdonában lévő TERA K8 lineáris terahertzes spektrométerrel, a mérések kiértékelése pedig a spektrométerhez tartozó TeraMat szoftverrel történt. A Mg-adalékolású LiNbO_3 minták 0,9–6,0 THz-es tartománybeli törésmutató és abszorpciós együttható-spektrumainak meghatározása távoli infravörös Fourier-transzformációs spektroszkópia módszerével történt a stuttgarti Max Planck Szilárdtestkutató Intézetben. Az anyagi paraméterek meghatározását interferometrikus feloldású transzmissziós görbék analízise alapján tettem meg, általam kidolgozott algoritmussal.

A nemlineáris optikai karakterizálás során használatos z -scan módszer általános elméletének kidolgozását analitikus módszerekkel tettem meg. A levezetésem során kapott differenciálegyenlet numerikus megoldása, integrálások elvégzése C++ kód segítségével történt.

A döntött impulzusfrontú pumpálással gerjesztett hagyományos (egylencsés és teleszkópos) és hibrid típusú impulzusforrások leképezésének optimalizálásához az útmutatót elméleti megfontolások alapján dolgoztam ki, analitikus levezetést alkalmazva. A leképezési hibák kvantitatív elemzése saját magam által fejlesztett programmal, illetve a TracePro sugárkövető szoftverrel történt. Az optikai rácok diffrakciós hatásfokának maximalizálása a szigorú csatolt hullámú analízisen alapuló GSolver szoftverrel történt.

A lézeres gyorsítókat elhagyó ionok extrém nagy térerősségű THz-es impulzusokkal való utógyorsítása elméletének kidolgozását analitikus módszerekkel tettem meg. Részecskecsomagok gyorsításának és monokromatizálásának (azaz az energiabeli szórás csökkentésének) szimulálására saját fejlesztésű kódot használtam. Ellenőrzésként, a töltött részecskék elektromágneses térrel való kölcsönhatásának vizsgálatára kifejlesztett GPT (General Particle Tracer, azaz Általános Részecskekövető) szoftverre is támaszkodtam.

4. Új tudományos eredmények

1. A LiNbO_3 dielektromos jellemzői a terahertzes tartományon

Meghatároztuk az adalékolatlan és magnéziummal adalékolt sztöchiometrikus (0,0–4,2 mol% Mg) és kongruens (0,0–8,4 mol% Mg) LiNbO_3 kristályok abszorpciós együtt-
ható- és törésmutató-spektrumait távoli infravörös Fourier-transzformációs spektroszkópia (1–7 THz, 10–300 K) [T1], illetve időtartománybeli THz-es spektroszkópia (0,25–2,5 THz, 300 K) [T2, T3] módszereivel.

1.1. A THz-es abszorpció viselkedése a Mg-koncentráció függvényében

Extraordinárius polarizáció esetén megállapítottuk, hogy az abszorpciós együtt-
ható-értékek sztöchiometrikus összetétel esetén a 0,68 mol%, kongruens összetétel esetén a 6,1 mol% magnézium-koncentráció értékig monoton csökkennek. Ezen küszöbértékek (melyek meg-
egyeznek a fotorefrakció megszüntetéséhez szükséges magnézium-koncentráció értékek-
kel [Palfalvi2004]) felett az abszorpciós együtt-
ható-érték monoton növekedését tapasztaltuk. Az UV abszorpciós él, a hidroxid-ionok infravörös abszorpciós sávja és a Curie-hőmérséklet kapcsán mutatott hasonló extrémális viselkedés alapján a THz-es abszorpció-változását is a magnézium hatására létrejövő hibaszerkezet-változással magyaráztuk [T1]. Elein-
te a Mg-adalék a Li helyeken ülő Nb-ionok (Nb_{Li}) számát csökkenti, mely a küszöb-
koncentrációnál válik nullává, minimálisra csökkentve az abszorpciót. Tovább növelve a Mg-koncentrációt, a Mg az eredeti helyén ülő Nb (Nb_{Nb}) helyére kezd beépülni, aminek hatására az abszorpció növekedni kezd.

1.2. Az optimális összetételű THz-generátor kristály

A THz-es tartománybeli abszorpciós együtt-
ható-spektrumok [T1, T2] és a fotorefrakció magnézium-koncentrációtól való függése [Palfalvi2004] alapján a THz-es sugárzás haté-
kony keltésére a minimális abszorpcióval rendelkező, fotorefrakciótól gyakorlatilag mentes – lehetőség szerint alacsony hőmérsékletre hűtött –, 0,68 mol% magnéziummal adalékolt sztöchiometrikus LiNbO_3 -ot találtam a legmegfelelőbbnek. [T1–T3]

1.3. A mérések megbízhatósága

Az időtartománybeli THz-es spektroszkópiai mérések [T2] lehetőséget nyújtottak a távoli infravörös Fourier-transzformációs spektroszkópiai mérésekhez [T1] használt mintaszele-
tek tökéletlen felületi megmunkálásából fakadó abszorpciós együtt-
ható-érték bizonytalanság csökkentésére.

2. A z -scan általános elmélete

Elméleti modellt dolgoztam ki [T4], mely tetszőleges mintavastagság esetén alkalmazha-
tó a mért z -scan görbék kiértékelésére, anélkül, hogy korlátot szabnánk a nemlineáris

törésmutató, illetve nemlineáris abszorpció mértékére. A nemlineáris törésmutatóval és nemlineáris abszorpcióval rendelkező közegben való nyalábterjedés leírására a nemlineáris paraxiális hullámegyenletet használtam.

Számos, a z -scan módszer elméletével foglalkozó szakirodalom az általam kidolgozott elmélettel ellentmondásos eredményre vezet. Felismertem ennek okát, ami egy közelítés helytelen alkalmazásából eredt. Több közlemény szerzője ugyanis a nemlineáris anyagban, a Gauss-nyalábbal történő megvilágítás hatására létrejövő, Gauss-függvénnyel leírható keresztirányú nemlineáris törésmutató-változást helytelenül parabolikusan közelíti. Rámutattam arra, hogy ez a (elsőre kézenfekvőnek tűnő) közelítés a z -scan görbék amplitúdójában majdnem egy nagyságrend növekedést okoz, ráadásul a görbe alakját is megváltoztatja. A méréseket a parabolikus közelítést használó modellekkel kiértékelve félrevezető eredmény adódik. [T4]

3. Cirkóniummal adalékolt LiNbO_3 z -scan vizsgálata

Különböző mennyiségű cirkóniummal adalékolt sztöchiometrikus LiNbO_3 mintasorozaton $0,3 \text{ MW/cm}^2$ intenzitású folytonos Ar-ion lézerrel nyitott apertúras z -scan méréseket végeztem. A görbék elemzése során arra következtettem, hogy a $0,085 \text{ mol\%}$ Zr-tartalmú kristály esetén a fotorefrakció a domináns nemlineáris hatás, míg nagyobb Zr-koncentrációknál a termooptikai hatás mellett a fotorefrakció nem mutatható ki. Megállapítottam, hogy a fotorefrakció megszüntetéséhez szükséges Zr-koncentráció valamivel nagyobb, mint az a (ultraibolya-, infravörös- és Raman-spektroszkópiai mérésekkel egyértelműsíthető) küszöbkoncentráció érték, ami a Li-helyeken ülő Nb-ionok mint hibahelyek megszüntetéséhez tartozik. [T5]

Megmutattam, hogy a Zr-adalékolású, küszöb feletti LiNbO_3 esetén a termooptikai nemlinearitás mértéke gyakorlatilag azonos a Mg-adalékolású, küszöb feletti LiNbO_3 -éval. E megállapítás azt demonstrálja, hogy az abszorpció az adalékolás típusától független.

4. Nagy átlagteljesítményű, hullámvezető alapú terahertzes impulzusforrás

Hullámvezető alapú, nagy átlagteljesítményű THz-es impulzusforrás elvét dolgoztam ki. E megoldás lehetőséget biztosít a THz-es impulzusok optikai egyenirányítással történő hatékony keltésére olyan nemlineáris anyagok esetén, melyek nemlineáris optikai együtthatója nagy és a THz-es tartománybeli abszorpciós együtthatója (hátrányosan) szintén nagy. A tervezett planáris struktúra nagy optikai nemlinearitású és nagy THz-es abszorpciójú magból és az azt szendvicsszerűen körülvevő, a magénál lényegesen kisebb THz-es abszorpciójú köpenyből áll. A hatékony THz-keltés érdekében a rétegvastagságokat, illetve a köpeny anyagát úgy kell megválasztani, hogy a THz-es sugárzás energiájának jelentős része a kis abszorpciójú köpenyben terjedjen, redukálva ezáltal az effektív abszorpciót. További követelmény, hogy a struktúra mind a pumpálásra (optikai tartomány), mind a

keltett THz-es sugárzásra nézve hullámvezetőként viselkedjen. Ehhez szükség esetén a mag és köpeny közé megfelelő anyagú filmréteget kell helyezni. A pumpálás és a keltett THz-es impulzus közti sebességillesztés biztosítása az egyes rétegek optimális méretezésével, emellett esetlegesen az impulzusfront megdöntésével történik. Javaslatot tettem egy LiNbO_3 magból, Si köpenyből és polimetilpentén (PMP) filmrétegből álló konkrét elrendezésre. [T6–T8]

5. Leképező optikát tartalmazó, döntött impulzusfrontú pumpálással gerjesztett terahertzes impulzusforrás optimalizálása

Rámutattam arra, hogy a leképező optikát tartalmazó döntött impulzusfrontú gerjesztésen alapuló THz-es impulzusforrások fontos limitáló tényezői a leképezési hibák okozta torzulások, melyek a pumpáló impulzusok időbeli kiszélesedésében, illetve a pumpálás impulzusfrontjának görbületségében mutatkoznak meg. A hatékony THz-keltés egyik feltétele, hogy a döntött impulzusfront mentén a pumpáló impulzushossz legjobban megközelítse a transzformáció-limitált értéket. Ennek teljesülése érdekében feltételt fogalmaztam meg, miszerint a nemlineáris közegben az optikai rács paraxiális képe párhuzamos kell legyen a döntött impulzusfronttal. [T9]

Hagyományos – azaz egy optikai rácsot, leképező optikát és nemlineáris közeg tartalmazó – döntött impulzusfrontú THz-keltési sémák esetén elméleti megfontolások alapján útmutatót származtattam, mely egyszerű képletek formájában megadja a kirótt feltételnek eleget tevő, optimális elrendezés geometriai paramétereit, azok kapcsolatát. Mindezt megtettem az egy lencsét [T9] és a két lencséből álló teleszkópot [T10] tartalmazó elrendezésekre. Irányítással a két elrendezéstípuson sugárkövetéses analízist hajtottunk végre. Megmutattuk, hogy szinglet lencsék helyett akromátot használva a pumpálás impulzushossz-változásának mértéke jelentősen csökken. Nagy energiájú THz-keltésre az akromát lencséből álló teleszkópos elrendezést találtuk a leoptimálisabbnak.

Egy lencsét tartalmazó elrendezés esetén sugárkövetéses számításokkal megmutattam, hogy a hosszabb fókusz távolságú lencse előnye, hogy csökken a pumpáló impulzusfront – egyúttal a THz-es sugárzás fázisfrontjának – görbülete, ezáltal a THz-es nyaláb divergenciája. [T9]

6. Leképező optikát nem tartalmazó THz-es impulzusforrás: a kontaktrács

Extrém-nagy energiájú THz-es impulzusok előállítására szolgáló impulzusforrás elvét dolgoztam ki. E döntött impulzusfrontú módszeren alapuló elrendezés fő ismérve, hogy nem tartalmaz leképező optikát. Leképezési hibák hiányában nem kell korlátot szabni a pumpáló foltméretre, így a pumpáló energiára sem. A kívánt mértékű impulzusfrontdőlés beállítása a THz-generátor kristály felületén kialakított optikai rács (kontaktrács)

rácsállandójának alkalmas megválasztásával történik. Az elrendezéssel a jelenleg elérhető THz-es energia nagyságrenddel történő felskálázása várható. [T11]

7. A hibrid típusú THz-es impulzusforrás

Javaslatot tettem olyan hibrid elrendezésre, mely a hagyományos döntött impulzusfrontú gerjesztésű impulzusforrás és a kontaktrács kombinációja. A kívánt mértékű impulzusfront-dőlés megosztottan jön létre a leképező optikát tartalmazó hagyományos elem és a kontaktrács között. A kontaktrácsra beeső nyaláb szögdiszperziójának köszönhetően megoldható, hogy a rács karcolatsűrűsége a jó megmunkálhatóság tartományába essen. A hibrid megoldás másik előnye, hogy a leképezési hibák jelentős mértékben redukálhatók a hagyományos elrendezéshez képest. Elméleti megfontolások alapján olyan útmutatót származtattam, mely egyszerű képletek formájában megadja az optimális hibrid elrendezés geometriai paramétereit, azok kapcsolatát. [T12]

8. LiNbO_3 , illetve LiTaO_3 alapú hibrid elrendezés

Irányítással a 7. tézispontban javasolt hibrid típusú THz-es impulzusforrás LiNbO_3 [T12] és LiTaO_3 [T13] anyagokra való adaptálása érdekében optimalizációs algoritmust dolgoztunk ki. A sebességillesztett THz-keltés kényszere mellett az optikai rács és a kontaktrács diffrakciós hatásfokát maximalizáltuk a bináris rács struktúrájának (rácsállandó, kitöltési tényező, maratási mélység) szisztematikus változtatásával. Megmutattuk, hogy a (háromfotonos abszorpció kizárása érdekében) feltételezett 1030 (LiNbO_3) és 800 nm (LiTaO_3) pumpálási hullámhosszakon a pumpáló-nyaláb nemlineáris kristályba történő hatékony becsatolása megoldható.

9. Töltött részecskék utógyorsítása extrém-nagy térerősségű THz-es impulzusokkal

Javaslatot tettem elektromosan töltött részecskék utógyorsítására szolgáló eszközre, melynek alapját szimmetrikusan elhelyezett dielektrikum prizmákból álló prizmapár képezi. A prizmák anyagába csatolt egyciklusú THz-es impulzusok a prizmák egymással párhuzamosan szemben álló határoló lapjain teljes visszaverődést szenvednek. E határolólapok közti – száz mikrométer nagyságrendű – térközben kialakuló evanescens tér biztosítja a gyorsítást. Megmutattam, hogy a napjainkban elérhető, MV/cm nagyságrendű csúcs elektromos térerősséggel rendelkező THz-es impulzusokkal hatékony utógyorsítás valósítható meg. Elméleti megfontolások alapján meghatároztam a részecske és a gyorsító impulzus közti optimális szinkronizáció feltételeit. Numerikus szimulációkkal megmutattam, hogy részecskecsomagok esetén a hatékony gyorsítás megvalósítása mellett a részecskecsomag energiaszórása jelentősen csökkenthető. Elvi szinten, technikai részletekre nem kiterjedően javaslatot tettem olyan néhány fokozatból álló utógyorsítóra, mellyel a hagyományos gyorsítókat elhagyó, néhányszor tíz MeV energiájú részecskék a hadronterápiához már

elegendő ($\gtrsim 100$ MeV) energiaszintre gyorsíthatók és a részecskenyaláb energiabizonytalansága jelentősen (1% alá) csökkenthető. [T14–T17]

5. Az eredmények hasznosítása

A legtöbb (mintegy 150) hivatkozás a [T1] közleményemre érkezett, ami azt bizonyítja, hogy a LiNbO_3 THz-es tartománybeli dielektromos jellemzőinek ismerete fontos azok számára, akik ezt az anyagot kívánják használni a terahertzes technikákban (pl. sugárforrásként). Az ebben a cikkben foglaltaknak megfelelően, csoportunk a korábban használt, optimálistól távoli összetételű LiNbO_3 -ról [Stepanov2003] áttért a 0,68 mol% Mg koncentrációjú sztöchiometrikus LiNbO_3 -ra [Hebling2004]. Ez a keltett THz-es impulzusenergia és konverziós hatásfok jelentős növekedését eredményezte. A [T1] publikációm megjelenése óta más csoportok is igyekeztek az abszorpció hatása csökkentése érdekében kriogenikus hűtést használni [Huang2013, Huang2015a, Wu2016]. A THz-es alkalmazások szempontjából optimális összetételű Mg-adalékolású kongruens LiNbO_3 terahertzes tartománybeli törésmutatója és abszorpciós együtthatója hőmérsékletfüggésének tanulmányozásával más csoportok is elkezdtek foglalkozni [Wu2015].

A Zr-adalékolású LiNbO_3 nemlineáris karakterizálásával kapcsolatos eredményeimet célszerű a közeljövőben THz-es spektroszkópiai mérésekkel kiegészíteni, hogy a potenciális THz-es alkalmazásokhoz átfogóbb képünk legyen erről az anyagról.

A döntött impulzusfrontú gerjesztésen alapuló hagyományos impulzusforrás leképezésére vonatkozó (általam kidolgozott) optimalizációnak a kísérletekben való érvényesítése a THz-es impulzusenergia felskálázásában komoly szerepet játszott.

Az általam javasolt, leképezési optika nélküli impulzusforrás (kontaktrács) különféle megvalósítási lehetőségeivel más csoportok is elkezdtek foglalkozni [Nagashima2010, Nagashima2012, Yoshida2016]. A PTE Fizikai Intézete Terahertzes Kutatócsoportjának sikerült ZnTe alapú kontaktráccsal jó hatásfokú THz keltést demonstrálni [Fülöp2016].

A LiNbO_3 és LiTaO_3 anyagokra tervezett hibrid (azaz leképezést és kontaktrácsot egyaránt tartalmazó) impulzusforrás biztató elméleti eredményeit remélhetőleg kísérletileg megvalósított elrendezés igazolja a közeljövőben.

A nagy átlagteljesítményű, hullámvezető alapú THz-es impulzusforrással kapcsolatos szabadalmaink egy módszerre és egyúttal egy iparilag megvalósítható eszközre is vonatkoznak, így semmi kétség nincs afelől, hogy az eszköz a közeljövőben a gyakorlatban megvalósuljon.

Az intenzív THz-es impulzusok evanescens terével történő iongyorsítással kapcsolatos [T14] publikáció áttörésnek tekinthető. Meghatározó szerepet töltött be ugyanis abban, hogy a részecskegyorsítással foglalkozó zárt közösség figyelmét a terahertzes impulzusokban rejlő lehetőségek felé terelje. Az általam javasolt (utó)gyorsító eljárás és eszköz szabadalmak formájában is közzétételre került. A gyakorlati megvalósításig azonban néhány fontos műszaki részlet kidolgozása még hátra van. Az elektronok THz-es térrel történő gyorsításának kísérleti demonstrálása előrébb jár [Huang2015b], az egyik megoldás az általam javasolt ötletből merít [Walsh2016]. A THz-es térrel történő elektrongyorsítás

közeljövőbeli demonstrálása csoportunknak is célja.

6. Irodalmi hivatkozások listája (idegen szerzők)

- [Auston1984] D. H. Auston, K. P. Cheung, J. A. Valdmanis and D. A. Kleinman. „Cherenkov radiation from femtosecond optical pulses in electro-optic media”. *Phys. Rev. Lett.* **53**, 1555 (1984).
- [Fülöp2016] J. A. Fülöp, Gy. Polónyi, B. Monoszlai, G. Andriukaitis, T. Balciunas, A. Pugzlys, G. Arthur, A. Baltuska and J. Hebling. „Highly efficient scalable monolithic semiconductor terahertz pulse source.” *Optica* **3** 1075 (2016).
- [Hebling2002] J. Hebling, G. Almási, I. Z. Kozma and J. Kuhl. „Velocity matching by pulse front tilting for large-area THz-pulse generation”. *Opt. Express* **10**, 1161 (2002).
- [Hebling2004] J. Hebling, A. Stepanov, G. Almási, B. Bartal and J. Kuhl. „Tunable THz pulse generation by optical rectification of ultrashort laser pulses with tilted pulse fronts”. *Appl. Phys. B* **78**, 593 (2004).
- [Huang2013] S.-W. Huang, E. Granados, W. R. Huang, K.-H. Hong, L. E. Zapata and F. X. Kärtner. „High conversion efficiency, high energy terahertz pulses by optical rectification in cryogenically cooled lithium niobate”. *Opt. Lett.* **38**, 796 (2013).
- [Huang2015a] W. R. Huang, S.-W. Huang, E. Granados, K. Ravi, K.-H. Hong, L. E. Zapata and F. X. Kärtner. „Highly efficient terahertz pulse generation by optical rectification in stoichiometric and cryo-cooled congruent lithium niobate”. *J. Mod. Opt.* **62**, 1486 (2015).
- [Huang2015b] W. R. Huang, E. A. Nanni, K. Ravi, K.-H. Hong, A. Fallahi, L. J. Wong, P. D. Keathley, L. E. Zapata and F. X. Kaertner. „Toward a terahertz-driven electron gun”. *Sci. Rep.* **5**, 14899 (2015).
- [Nagashima2010] K. Nagashima and A. Kosuge. „Design of rectangular transmission gratings fabricated in LiNbO₃ for high-power terahertz-wave generation”. *Jpn. J. Appl. Phys.* **49**, 122504 (2010).
- [Nagashima2012] K. Nagashima and A. Kosuge. „Erratum: “Design of rectangular transmission gratings fabricated in LiNbO₃ for high-power terahertz-wave generation””. *Jpn. J. Appl. Phys.* **51**, 119201 (2012).
- [Stepanov2003] A. G. Stepanov, J. Hebling and J. Kuhl. „Efficient generation of subpicosecond terahertz radiation by phase-matched optical rectification using ultrashort laser pulses with tilted pulse fronts”. *Appl. Phys. Lett.* **83**, 3000 (2003).

- [Walsh2016] D. A. Walsh, D. S. Lake, E. W. Snedden, M. J. Cliffe, D. M. Graham and S. P. Jamison. „Demonstration of sub-luminal propagation of single-cycle terahertz pulses for particle acceleration”. <https://arxiv.org/pdf/1609.02573v1.pdf> (2016).
- [Wu2016] X. Wu, K. Ravi, W. R. Huang, C. Zhou, P. Zalden, G. M. Rossi, G. Cirimi, O. D. Muecke and F. X. Kartner. „Half-percent terahertz generation efficiency from cryogenically cooled lithium niobate pumped by Ti:sapphire laser pulses”. <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1601/1601.06921.pdf> (2016).
- [Wu2015] X. Wu, C. Zhou, W. R. Huang, F. Ahr and F. X. Kärtner. „Temperature dependent refractive index and absorption coefficient of congruent lithium niobate crystals in the terahertz range.” *Opt. Express*, **23**, 29729 (2015).
- [Yoshida2016] F. Yoshida, K. Nagashima, M. Tsubouchi, Y. Ochi, M. Maruyama and A. Sugiyama. „High-efficiency contact grating fabricated on the basis of a Fabry-Perot type resonator for terahertz wave generation”. *Jpn. J. Appl. Phys.*, **55**, 012201 (2016).

7. Irodalmi hivatkozások listája (saját)

- [Fülöp2014] J. A. Fülöp, Z. Ollmann, C. Lombosi, C. Skrobol, S. Klingebiel, L. Pálfalvi, F. Krausz, S. Karsch and J. Hebling. „Efficient generation of THz pulses with 0.4 mJ energy”. *Opt. Express* **22**, 20155 (2014).
- [Palfalvi2004] L. Palfalvi, J. Hebling, G. Almasi, A. Peter, K. Polgar, K. Lengyel, and R. Szipoecs. „Nonlinear refraction and absorption of Mg doped stoichiometric and congruent LiNbO₃.” *J. Appl. Phys.* **95**, 902 (2004).

8. A tézispontok alapjául szolgáló saját tudományos közlemények

- [T1] L. Palfalvi, J. Hebling, J. Kuhl, A. Peter and K. Polgar. „Temperature dependence of the absorption and refraction of Mg-doped congruent and stoichiometric LiNbO₃ in the THz range”. *J. Appl. Phys.* **97**, 123505 (2005).
- [T2] M. Unferdorben, Z. Szaller, I. Hajdara, J. Hebling and L. Pálfalvi. „Measurement of refractive index and absorption coefficient of congruent and stoichiometric lithium niobate in the terahertz range”. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves* **36**, 1203 (2015).
- [T3] K. Lengyel, A. Peter, L. Kovacs, G. Corradi, L. Palfalvi, J. Hebling, M. Unferdorben, G. Dravecz, I. Hajdara, Z. Szaller and K. Polgar. „Growth, defect structure, and THz application of stoichiometric lithium niobate”. *Appl. Phys. Rev.* **2**, 040601 (2015).

- [T4] L. Pálfalvi, B. C. Tóth, G. Almási, J. A. Fülöp and J. Hebling. „A general z-scan theory”. *Appl. Phys. B* **97**, 679 (2009).
- [T5] L. Kovács, Z. Szaller, K. Lengyel, A. Péter, I. Hajdara, G. Mandula, L. Pálfalvi and J. Hebling. „Photorefractive damage resistance threshold in stoichiometric LiNbO₃:Zr crystals”. *Opt. Lett.* **38**, 2861 (2013).
- [T6] L. Palfalvi, J. A. Fulop and J. Hebling. „Absorption-reduced waveguide structure for efficient terahertz generation”. *Appl. Phys. Lett.* **107**, 233507 (2015).
- [T7] G. Almási, J. A. Fülöp, J. Hebling and L. Pálfalvi. „Optikai egyenirányításon alapuló gerjesztésű THz-es sugárforrás” (2015). Magyar Szabadalom, 229 943.
- [T8] J. Hebling, G. Almási, L. Pálfalvi and J. Fülöp. „Pulse excited THz waveguide source based on optical rectification” (2015). US Patent 9,128,349.
- [T9] J. A. Fülöp, L. Pálfalvi, G. Almási and J. Hebling. „Design of high-energy terahertz sources based on optical rectification”. *Opt. Express* **18**, 12311 (2010).
- [T10] L. Tokodi, J. Hebling and L. Pálfalvi. „Optimization of the tilted-pulse-front terahertz excitation setup containing telescope”. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves* **38**, 22-32 (2017).
- [T11] L. Palfalvi, J. A. Fulop, G. Almasi and J. Hebling. „Novel setups for extremely high power single-cycle terahertz pulse generation by optical rectification”. *Appl. Phys. Lett.* **92**, 171107 (2008).
- [T12] L. Pálfalvi, Z. Ollmann, L. Tokodi and J. Hebling. „Hybrid tilted-pulse-front excitation scheme for efficient generation of high-energy terahertz pulses”. *Opt. Express* **24**, 8156 (2016).
- [T13] L. Tokodi, A. Buzády, J. Hebling and L. Pálfalvi. „Possibility of high-energy THz generation in LiTaO₃”. *Applied Physics B* **122**, 235 (2016).
- [T14] L. Pálfalvi, J. A. Fülöp, G. Tóth and J. Hebling. „Evanescent-wave proton post-accelerator driven by intense THz pulse”. *Phys. Rev. ST Accel. Beams* **17**, 031301 (2014).
- [T15] G. Almási, J. A. Fülöp, J. Hebling, M. Mechler and L. Pálfalvi. „összeállítás és eljárás elektromosan töltött részecskék manipulálására” (2015). Magyar szabadalom, 230 293.
- [T16] G. Almási, J. Fülöp, J. Hebling, M. Mechler and L. Pálfalvi. „Method and setup to manipulate electrically charged particles” (Benyújtás éve: 2015). US Patent 9,497,848 B2.

- [T17] G. Almási, J. Fülöp, J. Hebling, M. Mechler and L. Pálfalvi. „Method and setup to manipulate electrically charged particles” (Benyújtás éve: 2014). Európai szabadalom, megadási szándéknyilatkozat kibocsájtva, lajstromszámra vár.